

# ロジスティクスにおける在庫管理

## ——理論的側面を中心として——

高田 富夫

### I. はじめに

IT 革命なる言葉が連日のようにメディアを賑わしたのは、もう一昨年のことになる。当時をかえりみると、IT 革命は、あたかも雨後の竹の子のように、主要なあらゆる国のあらゆる分野でいっせいに喧伝されたことが思い起こされる。とりわけわが国では90年代初頭以来、深刻さの度合いがつのり、破綻の瀬戸際まで追い込まれた日本経済の救世主として、IT は大きな期待を込めて迎えられたのであった。

翻って、それからほぼ1年後、IT 需要の増大に陰りが見えるとともに、IT 産業にも設備と人員の余剰感が現出した。IT 不況である。世の関心は少なくとも表面的にはIT から離れ、過大債務を抱える企業に市場からの退場を促して、不良債権の最終処理ならびに金融システムをいかにすみやかに安定化させようかという問題に移った感がある。しかし、最近の IT 不況はコンピュータ関連素材の在庫循環に起因するところが大きい。しかも、ソフトへのニーズは今なお根強く持続していることを忘れてはなるまい。IT 革命は未だ緒についたばかりである。IT 革命の経済的な意義は大きく、IT をどのように使いこなすかは、一国の国際競争力をも左右しかねない重要な課題である。

IT 革命の巨大なうねりの背景には、未曾有の不況からの出口が見出せず、競争が激化の一途をたどるこの時代を生き残ろうとする企業サイドの願望がある。その手本とされたのは、1980年代に双子（財政収支と国際収支）の赤字を抱えて経済の不振がつづき、90年代に入って敢然とよみがえったアメリカ経済である。

80年代当時のわが国では、円高と賃金上昇を克服して、戦後もっとも長く続いた好景気に沸きかえていた。その間アメリカ経済はひたすら臥薪嘗胆して、規制緩和と情報通信技術の積極的な利用を推し進めていた。90年代に入って、高成長や低いインフレ率、雇用増大など順調な動きに転じた経済環境のもとで、大規模な合理化が企業の生産性向上と国際競争力の復活をもたらすと同時に、IT 分野への集中投資が産業構造を大きく

転換させ、ロジスティクスと深い関連を有する新しい産業やビジネスモデルが次々と生まれてきた。

日米の立場は逆転した。あらためて、栄枯盛衰・諸行無常の響きを感じる。終身雇用制や年功序列賃金制に代表される日本型経営も今やすっかり色褪せたものになった。鉄鋼や造船などかつての基幹輸出産業は厳しい国際競争の結果として、従前の精彩を失っている。

わが国にとって90年代はまさに「失われた10年」であり、唯一の超大国として自信を取り戻したアメリカ経済にとっては「ロジスティクスの10年」であった。

失われた10年の間に、経済のボーダーレス化や企業のグローバル化はいっそう進展した。生産拠点のアジア諸国ことに中国への移転は今後いっそう活発化するものと見られる。本社機能と研究開発機能のみを残して、その他の機能は競争優位を獲得するのにもっとも有利な国に委ねる極端なグローバル企業もあらわれてこよう。わが国が明治の開国以来1世紀以上にわたって育んできた加工貿易パターンは、生産拠点の海外進出によって、今後大きく変わる可能性がある。それにともなう、効率的なグローバル・ロジスティクスの展開が今後ますます強く要請されていくものと見られる。

現代の物流はソフトとハードの両面でITと密接に関わるようになった。物流は従来の枠を越えて、企業の生産管理、販売管理、在庫管理と一体化し、経営管理の一サブシステムとして位置づけられるようになった。言い換えれば、物流は企業のトータルシステムの一要素として捉えられる。サプライチェーン・ロジスティクスである。そこでは、在庫の最適化とリードタイム短縮が特に重要な目的関数である。物流企業はいま、これらの点で顧客満足度をいかにして高めるかが問われている。その期待に応えることができてはじめて、物流企業はロジスティクス企業に昇華する。

荷主企業のグローバル化と物流関連事業の規制緩和に直面する物流企業は、すでに経営のダイナミックな転換に乗り出している。その転換には三つの方向が見られる。(1) 製造業や流通業におけるサプライチェーン・マネジメント=SCMへの参画、(2) 3PL業務の受託、そして(3) B2B、B2Cなどバーチャルマーケットプレースを利用したeコマースの開設と運営である。調達、在庫管理、保管、輸送の各種業務を含む3PLは、この形で荷主企業のサプライチェーン・マネジメントに参画することになるが、物流業務全般の受託や、個別業務の受託もこの範疇に含めることができる。

しかしながら、ドメスティック・ロジスティクスにおいても、SCMや3PL事業の展開には未知の部分が多く、容易でない。経営のダイナミックな転換を模索する動きは、先進的な一部の物流事業者に認められるにすぎない。ましてや別の業務が新たに加わるグローバル・ロジスティクスにおいては困難は倍化する。外航コンテナ船社では、海外展

開する荷主企業の姿勢や、通関手続きと港湾運送にかかる複雑な書類作成業務の電子化が十分に進展していないことなどから、グローバル・サプライチェーン・ロジスティクスに積極的に対応していこうとする姿勢を明確に打ち出すまでにいたっていない。ロジスティクスや3PLへの対応を経営戦略の中心に据えて事業展開を図っていくことに、さほどの緊急性を感じていないようにも見える。

先端ロジスティクスには航空輸送で対応し、船舶輸送はリードタイムや在庫管理に配慮しない単に輸送のみの従来型国際物流に対応させるという考え方がそこにあるとすれば、疑問を呈せざるをえない。スピード面では航空利用に劣るとしても、コスト面で船舶は優位にある。輸送手段の特質から見て、先端ロジスティクスに船社が関わりうる余地はけっして小さくないはずである。現に、わが国を代表する自動車メーカーはグローバル・ジャストインタイムを導入した世界戦略を確立しており、わが国船社も国際複合一貫輸送を通じてその一翼を担っている。グローバリゼーションのもと、わが国製造業の海外移転ラッシュは当分収まりそうにない。荷主企業が国際競争力の確保と向上に懸命となっている今日、それに貢献しえない物流事業者はそう遠くない将来、荷主企業によって排除されていくにちがいない。

1970年代後半以降、わが国の外航海運事業は守勢一方を強いられてきた。こうした事態を招いた本質は賃金や円レートにあるのではなく、イノベーションの停滞にある。ハード面でのイノベーションとそれに基づく競争優位の確保は今後ますますむずかしくなる。これにたいして、先端ロジスティクスという知的資産に基づく3PL事業の展開は、外航海運事業が国内外から再評価され、投資を呼び込み有能な人材を確保することにも通じる。豊富な物流ノウハウを武器として、グローバル・ロジスティクスのソリューションビジネスを中核とした事業戦略の確立に向けて発想の転換が急がれる。

本論は、以上のような問題意識のもと、ロジスティクスの最重要な課題の一つである在庫を取り上げ、その理論的側面をあらためて整理する。これをもってグローバル・ロジスティクス研究の第一歩としたいというのが本論執筆の主たる動機である。競争環境が厳しさを増しつつある中でのコスト引下げ圧力や、経営財務におけるアセットからキャッシュフロー重視への転換という一般経済の流れの中で、在庫に対する関心は一段と高くなってきた。サプライチェーン・マネジメントが脚光を浴びつつける大きな理由がここにある。

しかしながら、グローバル・ロジスティクスにおいては、在庫に対する意識はこれまでどちらかといえば希薄であった。輸出企業は、その輸出貨物がわが国の港を離れてしまえば、その後の動向に注意を払うことはあまりなかった。その背景には、輸出はFOBでという貿易慣行や、外国における物流システムに十分な情報や知識を持ち合わせてい

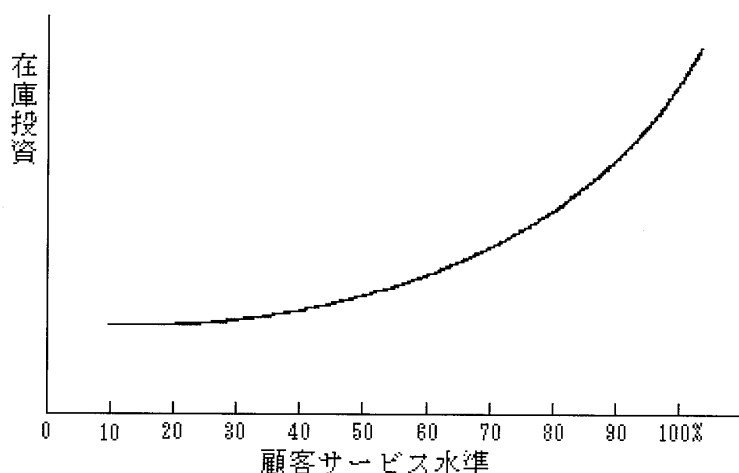
なかったことがあるものと考えられる。グローバル物流事業者も、運送責任を全うすることのみに目を奪われ、外国の港に陸揚げされた貨物のその後の動きについて無関心であった。この点は、国際複合一貫輸送の進展によって、ある程度改善されたかのように見えるが、自己の責任範囲が陸上の鉄道ないしトラックターミナルまで拡張されただけで、荷主企業のロジスティクス効率改善に積極的な役割を果たそうとする明確な姿勢はいまだ見られない。もしも彼らがロジスティクス企業を名乗るのであれば、この点での積極的な行動にでてしかるべきである。そのためには、物流事業者、とくにグローバル物流事業者が荷主企業のロジスティクスに対する理解を深めることが何よりも重要である。

## Ⅱ．在庫管理の基本的な考え方

さて、在庫管理では伝統的に、追加発注すべき数量と時期をどのように決めればよいかということが基本的な問題とされてきた。こうした問題の答えは簡単な計算によって求めることができる反面、KKD（経験・感・度胸）という表現があるとおおり、在庫管理者の経験と洞察力が問われる課題でもある。厳しい競争下にある今日の経営環境において、在庫管理にたいする関心には極めて強いものがある。企業は、コスト削減と顧客サービスの改善に資するロジスティクス・システムを構築して、在庫管理の効率をいっそう高めるよう、要請されている。

在庫管理では、どんな方法を選択するにせよ、コストと顧客サービスの関係を常に考慮しなければならない。図1は在庫と顧客サービス水準の関係を一般化してあらわした

図1 在庫と顧客サービス水準の関係



ものであり、在庫投資の増大が顧客サービスを向上させることを示している。したがって両者は企業から見て基本的に二律背反の関係にある。今日、求められているのは在庫投資もしくは総ロジスティクスコストの削減と顧客サービスの向上という相反する二つの目的を同時に実現するロジスティクス・ソリューションである。Coyle 他によれば、こうしたトレードオフは次のような方法を通じて克服できるものと考えられている。

- (1) 発注管理システムを改善して、環境変化に柔軟に対応できるものとする。
- (2) ロジスティクス情報を経営戦略の立案に活かす。
- (3) 輸送サービスの効率性と信頼性を高める。
- (4) 必要な場所で必要なときに必要な量だけ供給するよう、在庫配置を改善する。

### Ⅲ．確実性下における定量発注：基本モデル

定量発注モデルは、一定量の製品を固定的に追加発注するものである。その場合の発注量は、製造費や需要特性とともに、在庫維持費や追加発注費にも依存する。

定量発注法では、一定量を追加発注する時点を求めるために、最小手持ち在庫量を設定する必要がある。これを追加発注点という。在庫量があらかじめ決められた水準にまで減少するとき、一定量が「自動的に」発注される。この一定量は英語表現を直訳して経済的発注量 (EOQ) と言われる。しかし、それが意味するところからは最適発注量と表現したほうが理解を容易にすると思われるので、本論ではこの表現を用いることにする。

定量発注法はツービンシステムとも言われる。二つの箱を用意しておき、第一の箱が空になったときに発注する。第二の箱にあるアイテムは、発注品が到着するまでの間、品切れを起こさないために必要な在庫量になる。発注量は、在庫維持費と追加発注費とともに、アイテムの製造費用と需要に依存する。在庫発注量 (単位数) は、発注品が納品されるまでに要する時間と、1日あるいは1週間に何単位売れていくかといったような、その期間の売却による在庫減耗率に依存する。

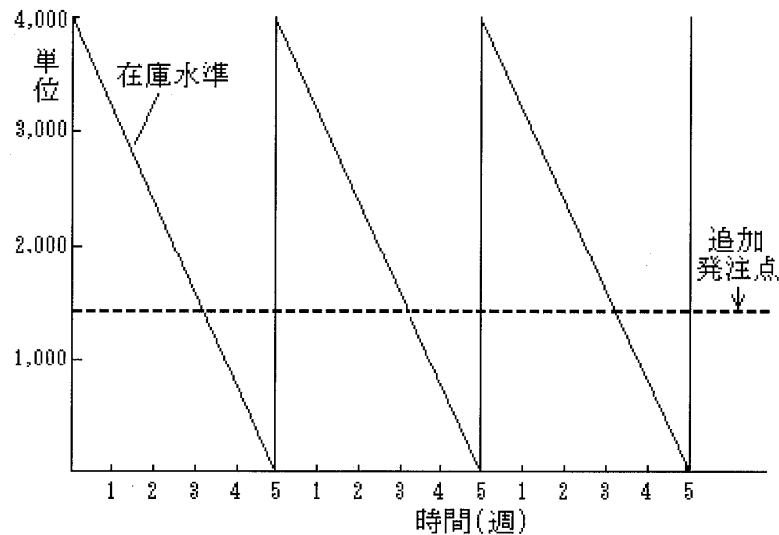
例えば、発注から納品までのリードタイムが2週間で、その間の一日あたり販売量が10単位である場合、追加発注点は140単位 ( $14日 \times 10単位/日$ ) になる。

#### 1) 在庫サイクル

図2は、確実性を前提とした三つの在庫サイクルからなる定量発注モデルをあらわしたものである。確実性とは、需要が一定量づつ常に発生し、その状況があらかじめわかっている、つまり既知であることを意味している。需要は一定であるから在庫減耗率も一

定となり、時系列在庫関数は線型になる。図は、在庫サイクル（5週間で一定）開始時点の在庫量を4,000単位とし、手持ち在庫が1,500単位まで減ると、追加発注が行われる状況をあらわしている。4,000単位の在庫は5週間で完全に取り崩されてしまうから、一週間あたりの在庫減耗は800単位になる。

図 2 確実性の下での定量発注モデル



追加発注点は、発注から納品されるまでの時間つまりリードタイムとの関連で決まる。例えばリードタイムが2週間であれば、この期間中の在庫減耗は1,600単位になる。したがって、この1,600単位が追加発注点となり、 $1600 = 4000 - 800t$  より  $t = 3$  であるから、在庫サイクルの第三週目が終わった時点で2,400単位を追加発注すればよい。その場合には、在庫の状況を棚卸などで頻繁に確認する必要はない。必要な情報は需要（在庫減耗）動向と補充リードタイムだけである。

## 2) 基本モデル

基本モデルで設定されている主な仮定は以下の通りである<sup>1)</sup>。

1. 需要は一定の割合で連続的に発生し、既知である。
2. リードタイムも一定で既知である。
3. 品切れは発生しない。

1 本文に掲げた仮定のほかに、主なものとして、資本の利用可能性に制約がないことがある。この仮定も無視できないけれども、資本に関わる決定はロジスティクス部門の領域外でなされることが多い。領域外から資本制約が課された場合、在庫ロットに上限を設ける形で、在庫決定に影響がでる。

図3 在庫維持費

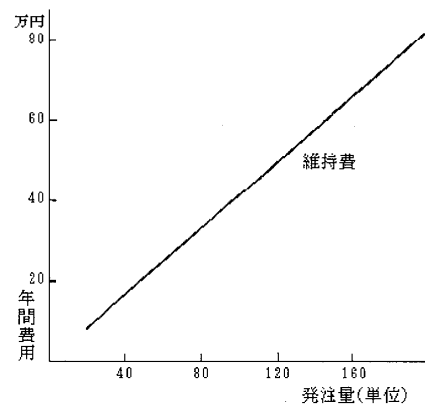


図4 発注量と発注費

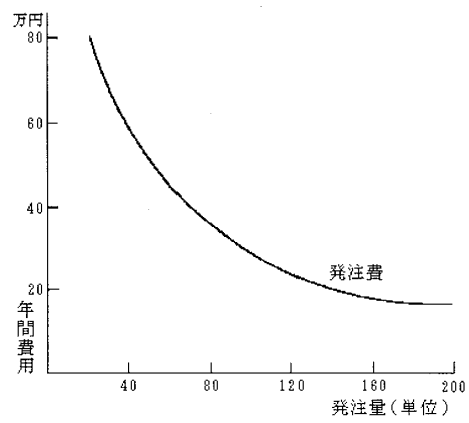
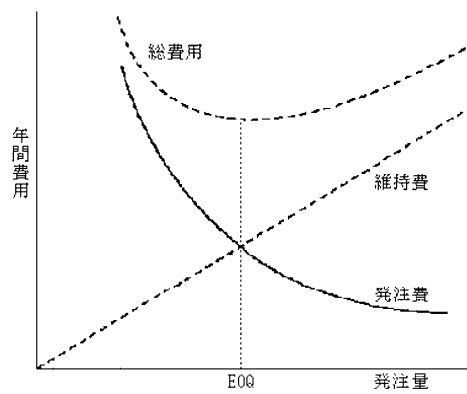


図5 発注量と在庫費用



4. アイテムの価格や各種の費用は発注量や発注時点に関係なく、一定である。
5. 移動在庫をもたない。
6. 在庫アイテムは一つ、もしくは複数であっても諸アイテムは互いに独立している。
7. 無限の計画期間

はじめの三つの仮定は確実性の条件を構成する。需要発生率や在庫減耗、リードタイムは既知で一定である。したがって、在庫を補充するための新たな生産や納品は規則的に行われ、品切れの可能性は考えなくともよい。

こうした確実性の仮定に対して、それは強すぎる仮定であり、現実の在庫管理には適さないとの見方がある。しかしながら、次のような場合には、強すぎる仮定として排除することは必ずしも適当ではない。すなわち第一に、需要の変動がひじょうに小さい場合、モデルを複雑化しても、精度の向上はあまり期待できない。第二に、在庫モデルによる在庫管理に乗出したばかりの企業にとって、利用できるデータは限られているはずであり、わずかなデータを複雑なモデルに投入しても、的確な結果は得られないことが多い。第三に、投入変数の変化は単純モデルから得られる結果に敏感に反映されない。言い換えれば、需要、在庫維持費、発注費に多少の変動があっても、最適発注量に大きな影響はでない。

費用不変に関する第四の仮定は、発注量に応じて購入価格は変化せず、安定していることを意味する。

移動在庫をもたないという仮定は、CIF 価格で調達資材を購入し、FOB 価格で製品を売却することを意味する。言い換えれば、輸送費を負担するのは買手であるという状況を想定している。輸送費の負担があるか否かは、アイテムの所有権に関ってくる。この仮定は、調達局面において納品を受けるまで、販売局面において工場や自社物流センターを離れた後、売手はいずれにおいても所有権がないことを意味している。輸送途上にあるアイテムの管理責任はなく、その間の維持費も負担しなくてよい。

基本モデルは以上の仮定のもとで、在庫維持費と発注費という二種類の費用だけを取り上げ、両者の二律背反的な関係を通して、在庫決定の状況を説明するものである。ここで、在庫維持費のみを考えた場合、それは発注ロットの増大にともなって増加するから、発注量はできるだけ小さくしたほうがよい（図3参照）。他方、発注費だけを考慮する場合、発注ロットを大きくして一定期間あたりの発注回数を減らせば、一定期間あたりの総発注費は少なくなる（図4参照）。そこで、最適な発注ロットは発注費と維持費の和である総費用を最小化するものとして求められる（図5参照）。



## 3) 数学的表現

基本モデルを数学的に表現すると次のようになる。まず、在庫に関連する費用の年間総額は

$$TAC = \frac{1}{2} QVW + A\frac{R}{Q} \quad \text{または} \quad TAC = \frac{1}{2} QS + A\frac{R}{Q} \quad (1)$$

である。ただし

$R$  = 年間需要量または必要量 (単位)

$Q$  = 発注量または発注ロット (単位)

$A$  = 発注費 (発注 1 回あたり)

$V$  = アイテムの単価

$W$  = 年間維持費率 (アイテムの最終販売価額の割合)

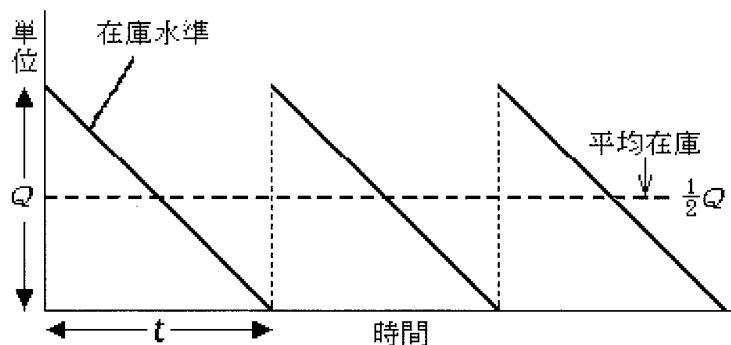
$S = VW$  = アイテム 1 単位あたりの年間維持費

$t$  = 時間 (日数)

$TAC$  = 年間総費用 (1 年間の金額)

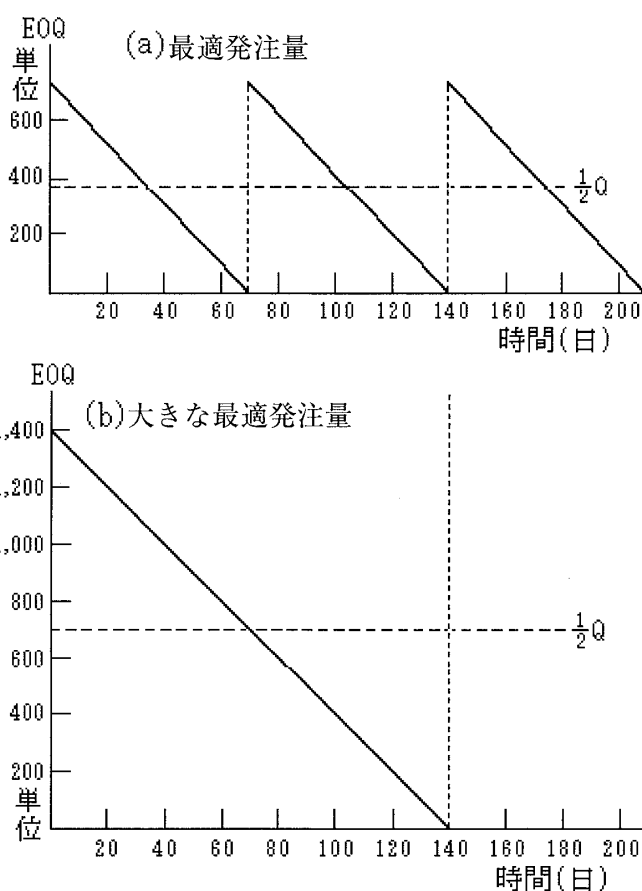
(1) 式右辺第 1 項は在庫維持費である。それは、発注サイクルにおける平均在庫量 (平均最適発注量) ( $\frac{1}{2}Q$ ) に維持費 (維持費率  $W \times$  単価  $V$ ) を掛け合わせたものに等しい。図 6 はこの式の背後にある論理を簡潔に示したものであり、それは曲線の形状から鋸歯モデルと言われる。縦軸  $Q$  は、与えられた時間に、発注量と発注サイクル初めの手持ち在庫量をあらわしている。需要は既知かつ一定であるから、一つの発注サイクル ( $t$ ) において、アイテムの手持ち在庫量は斜線の傾きが表わす一定の割合で減少していく。この期間の平均手持ち在庫量は在庫維持費に影響する。需要率は一定であるから、平均手持ち在庫量は単純に初期在庫量の二分の一である。図 6 の水平破線は平均在庫量である。 $Q$  を 100 単位、毎日の需要を 10 単位とすると、100 単位の初期在庫で 10 日間の事業継続が可能である。1 在庫サイクルの中間時点 (5 日目) では 50 単位が残っており、それは  $Q$  の半分  $\frac{1}{2} \times 100$  である。

図 6 鋸歯モデル



総費用を求めるには、平均単位数だけでなく、アイテムの単価と維持費率を知る必要がある。維持費率はアイテムによって異なるし、保管作業の状況によっても異なる。初期在庫量が大きくなるにつれて、在庫維持費も多くなる。つまり、発注量が大きくなれば、在庫が無くなるまでの期間はそれだけ長くなり、維持費は増加する。需要率（在庫減耗率）を一定とすると、最適発注量が大きくなるにつれて、平均在庫量も増加する（図7参照）。

図7 鋸歯モデル



(1)式右辺第2項は発注費である。発注1回あたりの発注費と在庫減耗率は一定と仮定しているから、発注量を大きくするならば、年間の発注回数は少なくなる。したがって、年間の発注費も少なくなる。それでは、発注量はどのような水準に設定すればよいのだろうか。在庫費用から見て最適な発注量とは、年間の総在庫費用が最小になるような量である。それは年間総在庫費用関数 (1)式を  $Q$  に関して微分し、その結果をゼロと置くことによって求められる。

(1)式を  $Q$  に関して微分すると、

$$\frac{d(TAC)}{dQ} = \frac{VW}{2} - \frac{AR}{Q^2}$$

となる。 $d(TAC)/dQ = 0$  として、 $Q$  について解くと、

$$Q^2 = \frac{2RA}{VW} \quad \text{したがって} \quad Q = \sqrt{\frac{2RA}{VW}} \quad \text{または} \quad Q = \sqrt{\frac{2RA}{S}}$$

が得られる。これは在庫費用を最小化する初期在庫量（＝発注量）という意味で最適であり、一般に経済的発注量とよばれている。アイテムの単価（ $V$ ）を1万円、維持費率（ $W$ ）を25%、発注費（ $A$ ）を2万円、年間需要量（ $R$ ）を＝3,600単位とすると、最適発注量は次のようになる。

$$Q = \sqrt{\frac{2RA}{VW}} = \sqrt{\frac{2R}{AS}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,600 \cdot 20,000}{10,000 \cdot 25\%}} = 240 \text{ (単位)}$$

表1は、発注量を100単位から500単位まで変化させて、在庫維持費と総費用の変化の様子を見たものであり、図8はそれを図示したものである。

表1 発注量と年間総費用（金額の単位は万円）

発注量 $Q$	年間発注費 ( $AR/Q$ )	年間維持費 ( $QVW/2$ )	年間総費用 TAC
100	72.00	12.50	84.50
140	51.43	17.50	68.93
180	40.00	22.50	62.50
220	32.73	27.50	60.23
240	30.00	30.00	60.00
260	27.69	32.50	60.19
300	24.00	37.50	61.50
340	21.18	42.50	63.68
400	18.00	50.00	68.00
500	14.40	62.50	76.90

図 8 最適発注量

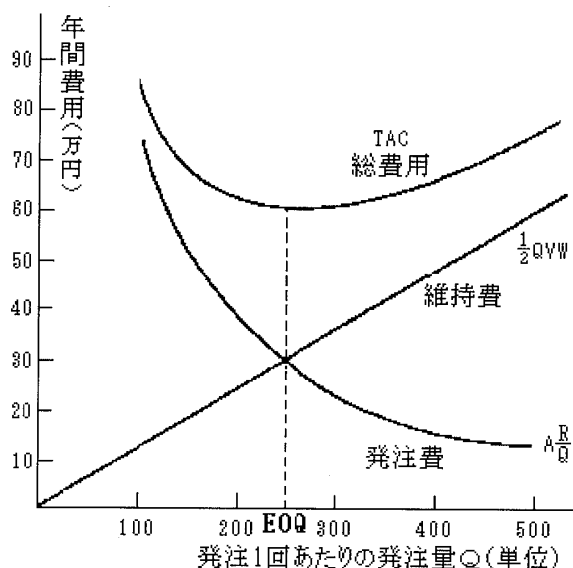


表 1 は、発注量が少なければ年間発注費は多くなる反面、年間維持費は少なくなることを示している。発注量が240単位にいたるまでは、年間の発注回数が減るので発注費は減少するが、維持費は平均在庫量が多くなるために増加する。240単位を越えると、維持費の通増幅は発注費の通減幅より大きくなり、総在庫費用は増加する。

この表は総在庫費用からみて  $Q = 240$  が最適であることを示している。表 1 のデータから作成した図 8 を見ると、180～320 の範囲の発注量変化は総在庫費用関数に小さな変化しかもたらししていない。つまり、この範囲で発注量を多少変更しても、総在庫費用に大きな影響はでない。

#### 4) 追加発注点

在庫管理では、発注量と同様に発注時点を決定しなければならない。追加発注点に意図的に対応する“発注時点”は在庫量の水準によって異なる。确实性の仮定の下で、補充リードタイム中に在庫切れを起こさずにすむ量の在庫を維持する必要がある。したがって、リードタイムを既知とする仮定から、追加発注点はリードタイム（日）に1日あたり在庫減耗を掛け合わせることによって求められる。

補充リードタイムは主に発注処理、発注準備、発送準備、輸送といった作業に要する時間から構成される。それは、ベンダーに在庫があるのかそれとも在庫がなく工場生産することから始めなければならないのかどうか、どんな輸送モードを使うか等々の諸要因によって変動する。

発注伝票の送付に1日、発注処理と発送準備に2日、輸送に5日かかる場合、補充リー

ドタイムはそれらを合計した8日になる。需要が1日10単位 ( $3600 \div 360$ ) づつ発生し、その分だけ在庫が減耗するとすると、追加発注点は80単位 ( $8 \text{ 日} \times 10 \text{ 単位/日}$ ) になる。

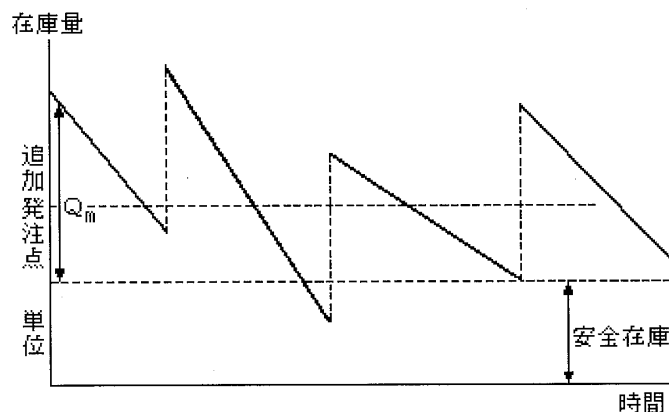
#### IV. 不確実性下における定量発注

##### 1) 追加発注点

追加発注点は、確実性の条件下で、補充リードタイムと1日あたりの在庫減耗を掛け合わせたリードタイム中の在庫減耗と、手持ち在庫量が等しくなる時点として求められる。したがって、在庫サイクル期末に在庫が底をつくちょうどその時に、前以て発注がなされていた在庫が納品され、品切れの事態は生じない。しかし、こうした確実性の仮定は在庫管理の原理を理解する第一歩として役立つけれども、ほとんどの企業にとって実態に即したものではない。

確実性の仮定が満たされることはあまりない。その理由は第一に、顧客の購買行動は普通、時間的にも量的にも不規則であり、そのため在庫減耗率は不安定になるからである。加えて、補充リードタイムも変わりやすい。輸送時間は距離が長くなるほど不安定になる。特にトラックによる輸送時間は、道路の混雑や事故のために不安定になることが多い。ITによって各段にスピードアップした発注処理にも問題がないわけではない。発注メールの見落としやコンピュータのシステム障害により、確実な在庫補充が行われない場合もある。図9はこうした不安定な状況における、すなわち不確実性の条件下での定量発注モデルをあらわしたものである。

図9 不確実性下における定量発注モデル



この場合の最適な追加発注点は、それまでの経験と実態調査に基づいて得られる需要やリードタイムの確率分布を利用して求めることができる。その際重要なのは、需要の変動を吸収させる安全在庫（緩衝在庫）の水準である。つまり、不確実性の条件下における追加発注点は、安全在庫に配慮して求めねばならない。その水準は、高すぎて在庫費用が過大にならないようにすると同時に、低すぎて品切れが生じ機会ロス<sup>2)</sup>が生じないようにしなければならない。この場合の追加発注点は、図9に示したとおり、リードタイム中の1日平均需要に安全在庫を加えたものである。次にその算出プロセスについて見ておこう。

## 2) 需要の不確実性

最初に、不確実性を引き起こす要因を1つだけ取り上げる。その場合にもっとも重要な要因は在庫減耗率である。そこで、基本モデルにおける需要一定の仮定のみを緩和することにする。需要が不安定かつ未知であるので、品切れが生ずる可能性がある。需要と品切れに関するもの以外のすべての仮定はそのまま維持する。

1. リードタイムも一定で既知である。
2. アイテムの価格や各種の費用は発注量や発注時点に関係なく、一定である。
3. 移動在庫をもたない。
4. 在庫アイテムは一つ、もしくは複数であっても諸アイテムは互いに独立している。
5. 無限の計画期間
6. 資本の入手可能性に制約がない

一定量を追加発注すると想定した基本モデルにこのような不確実性を導入すると、まず初めに、リードタイム中の顧客需要の変化に対応するために在庫水準を再検討しなければならない。確実性を仮定した先の例で、発注量は240単位、追加発注点は100単位であったが、売り上げそのものが変化し、240単位の初期在庫が100単位に減少するまでの時間も変化する可能性があるという不確実性に対しては、安全在庫の考え方をもちいて対応するのが一般的である。安全在庫を高めに設定し、追加発注点を引き上げると、手持ち在庫が多くなりすぎることになりかねない。逆にあまりに低く設定すると、品切れの恐れが生ずる。

ここで先の例を拡張して、リードタイム中の需要が100～160単位の範囲で変動し、需要は10単位ずつ変化する離散型分布をもち、それぞれの水準の需要は表2に示された一定の確率で発生すると仮定しよう。この場合、発生が期待される需要量に応じて、七つ

---

2 機会ロスとは、品切れが生じて販売機会を失うことによる、現在および将来の売上げ損をいう。

の追加発注点を考察しなければならない。表3は、過剰在庫と品切れの状況を七通りの追加発注点ごとに明示するために作成したものである。表には実際の需要と追加発注点の差が記されている。

表2 リードタイム中の  
需要の確率分布

需 要	生起確率
100単位	0.01
110	0.06
120	0.24
130	0.38
140	0.24
150	0.06
160	0.01

品切れで顧客の需要が満たされないときは、アイテム1単位あたり1,000円の品切れ費用 ( $k$ ) がつねに発生すると仮定しよう。品切れ費用は現時点と将来の売り上げを逸することによる利益の機会費用である。

表3 追加発注点と実際の需要に対応したリードタイム期末における在庫過不足

実際の 需要	追 加 発 注 点						
	100	110	120	130	140	150	160
100	0	10	20	30	40	50	60
110	-10	0	10	20	30	40	50
120	-20	-10	0	10	20	30	40
130	-30	-20	-10	0	10	20	30
140	-40	-30	-20	-10	0	10	20
150	-50	-40	-30	-20	-10	0	10
160	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0

基本モデルの場合と同様に、アイテムの単価を1万円、年間在庫維持費率を25%と仮定して、安全在庫の維持費を求める。この維持費率はアイテムの価額に対する割合であるから、1万円に25%を乗じた2,500円が年平均の在庫維持費である。品切れ費用1,000円は1在庫サイクルまたは発注回数あたりの費用である。したがって、この1,000円に年間の在庫サイクル数ないし発注回数を乗じて年間の品切れ費用を求める。こうして、年間の在庫維持費と品切れ費用の合計を求め、それぞれの追加発注点が招くコストを算出する。

表 4 在庫過不足の期待単位数

实际需要	生起確率	追 加 発 注 点						
		100	110	120	130	140	150	160
100	0.01	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
110	0.06	-0.6	0.0	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0
120	0.24	-4.8	-2.4	0.0	2.4	4.9	7.2	9.6
130	0.38	-11.4	-7.6	-3.8	0.0	3.8	7.6	11.4
140	0.24	-9.6	-7.2	-4.8	-2.4	0.0	2.4	4.8
150	0.06	-3.0	-2.4	-1.8	-1.2	-0.6	0.0	0.6
160	0.01	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0

【最小費用追加発注点の算出】

①平均過剰値( $e$ ) * 1	0.0	0.1	0.8	3.9	10.8	20.1	30.0
②年間在庫維持費( $VW$ )	¥0	¥250	¥2,000	¥9,750	¥27,000	¥50,250	¥75,000
③平均不足値( $g$ ) * 2	30.0	20.1	10.8	3.9	0.8	0.1	0.0
④平均品切れ費用( $gk$ ) = $G$	¥30,000	¥20,100	¥10,800	¥3,900	¥800	¥100	¥0
⑤年間品切れ費用( $GR/Q$ )	¥450,000	¥301,500	¥162,000	¥58,500	¥12,000	¥1500	¥0
⑥年間総費用(②+⑤)	¥450,000	¥301,750	¥164,000	¥68,250	¥39,000	¥51,750	¥75,000

備考 (1)対角線より上の値の合計 (2)対角線より下の値の合計 (3)①③④は 1 在庫サイクルあたりの数値

表 4 では、それぞれの需要水準の生起確率が、不足（過剰）数量の期待値と掛け合わされている。この表の下部分が示すように、七つの追加発注点それぞれにおける不足（過剰）数量の期待値を求めるために、対角線より下（品切れの場合）と上（過剰在庫の場合）の数値の合計を求める。この計算で使用する変数は以下の通りである：

$e$ =平均過剰在庫量の期待値

$g$ =品切れ量の期待値

$k$ =品切れ平均費用の期待値

$G = gk = 1$  在庫サイクルあたり品切れ費用の期待値

$G \frac{R}{Q}$ =年間品切れ費用の期待値

$eVW$ =過剰在庫に対する年間維持費の期待値

以上によって、7つの追加発注量それぞれに対応する総費用が決まる。この事例で、追加発注点を140単位とすると総費用は最小になる。こうして求めた発注量ではそれぞれの在庫サイクルで在庫の過不足を招く可能性があるけれども、年間を通した総費用を最小化（39,000円）する。なお、表 4 の⑤で使用した年間発注回数は、現実性を条件とした数値例の15回をそのまま適用している。ちなみに、そこでは年間需要量を3,600単位とし、1 在庫サイクルにおける最適発注量は240単位であった。

ここで、以上の考え方を数学的な表現でまとめておこう。まず、不現実性を条件とし



た総費用モデルは次のようになる。

$$TAC = \frac{1}{2}QVW + A\frac{R}{Q} + eVW + G\frac{R}{Q} \quad (2)$$

この右辺第3項は過剰在庫の年間維持費、第4項は年間の品切れ費用である。最小総費用を最小化する発注量を求めるために、(2)式を  $Q$  に関して微分すると、

$$\frac{d(TAC)}{dQ} = \frac{1}{2}VW - \frac{R(A+G)}{Q^2}$$

これをゼロと置き  $Q$  について解くと、次の最適発注量を得られる。

$$Q = \sqrt{\frac{2R(A+G)}{VW}}$$

追加発注点として表4から得た140単位を使用すると、費用最小化最適発注量は次のような値をとる。

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,600 \cdot (20,000 + 800)}{10,000 \cdot 25\%}} \approx 245$$

この最適発注量245単位は、不確実性条件下において、表4に示した種々の追加発注点に対する期待品切れ費用を変化させる。そこでは、確実性条件下における品切れ費用(1,000円)をそのまま取り込んで計算を進めた。しかしながら、確実性条件下における最適発注量は240単位であったから、確実性条件の如何による最適発注量の変化はほとんどなかったと言ってよい。したがって、品切れ費用にも影響はほとんどなく、この点への配慮は不要であろう。この分析の結果をまとめると、不確実性の条件下における最適発注量は245単位であり、在庫が140単位(追加発注点)まで減少したとき、この245単位を追加発注する、ということになる。

最後に、年間の在庫総費用は次のように計算される。

$$\begin{aligned} TAC &= \frac{1}{2}QVW + A\frac{R}{Q} + eVW + G\frac{R}{Q} \\ &= \left(\frac{1}{2} \cdot 245 \times 10,000 \times 25\%\right) + \left(20,000 \frac{3,600}{245} + 10.8 \times 10,000 \times 25\%\right) + \left(800 \frac{3,600}{245}\right) \\ &= 306,250 + 293,878 + 27,000 + 11,755 = 638,883 \end{aligned}$$

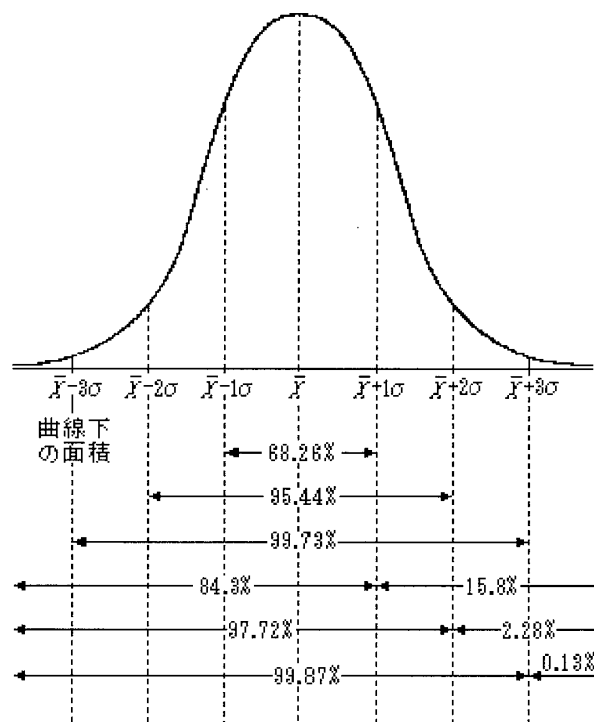
この値は確実性条件における値と比較して明らかに多い。このことは需要の不確実性をモデルに導入することにより、在庫総費用が少なくとも増大することがありうることを示唆するものである。リードタイムのような要因を不確実要因としてモデルに導入することは、在庫費用をさらに増やす可能性がある。

### 3) 需要とリードタイムの不確実性

現実により近い在庫管理を念頭において、需要とリードタイムの二つが変化する場合について考えてみよう。この場合の安全在庫の算出は需要だけが変化する場合よりもはるかに複雑になるけれども、重要なのは、リードタイム中に顧客がどれだけの製品を需要するかという点である。その第一段階として、リードタイム中の需要分布を知る必要がある。特に、リードタイム中における需要の平均値と標準偏差を正確に推定しなければならない。

図10は正規分布がもっている二つの重要な特性をあらわしている。正規分布は左右対称であり、平均値はモード（最頻値）に等しい。正規曲線より下にある部分の約68.26%が平均値から1標準偏差（ $1\sigma$ ）の範囲内にある。2標準偏差（ $2\sigma$ ）の範囲内には95.44%、3標準偏差（ $3\sigma$ ）の範囲内には99.73%ある。

図10 正規分布



リードタイム中の需要の平均値と標準偏差を計算すると、それぞれの追加発注点に対する品切れ確率を求めることができる。いま図10がリードタイム中の需要分布をあらわすものと仮定しよう。追加発注点を  $\bar{X} \pm 1\sigma$  の範囲に設定すると、リードタイム中の需要が手持ち在庫量より大きくならない確率、言い換えると品切れを生じない確率は84.13%になる。範囲を  $\bar{X} \pm 2\sigma$  に拡張すると、その確率は97.72%まで高まる。さらに  $\bar{X} \pm 3\sigma$  では99.87%まで高まる。不確実性を条件とした場合、追加発注点を大きくする

ことは安全在庫を増やすのと同じ効果がある。最終的に、在庫の追加を正当化する理由を見出さねばならない。

次式を使って、リードタイム中の需要平均値と標準偏差を計算する<sup>3)</sup>。

$$\bar{X} = \bar{R} \cdot \bar{X}_{LT}$$

$$\sigma = \sqrt{\bar{X}_{LT} \cdot \sigma_R^2 + \bar{R}^2 \cdot \sigma_{LT}^2}$$

ただし  $\bar{X}$  = リードタイム中における需要の平均

$\sigma$  = リードタイム中における需要変動の標準偏差

$\bar{X}_{LT}$  = 平均リードタイム

$\sigma_{LT}$  = リードタイムの標準偏差

$\bar{R}$  = 1日あたり需要の平均

$\sigma_R$  = 1日あたり需要の標準偏差

1日あたり需要の平均値と標準偏差をともに20単位、リードタイムの平均値と標準偏差をそれぞれ8日と2日とすると、リードタイム中の需要の平均値と標準偏差は次のようになる。

$$\bar{X} = \bar{R} \cdot \bar{X}_{LT} = 20 \cdot 8 = 160$$

$$\sigma = \sqrt{\bar{X}_{LT} \cdot \sigma_R^2 + \bar{R}^2 \cdot \sigma_{LT}^2} = \sqrt{8 \cdot 4^2 + 20^2 \cdot 2^2} = \sqrt{1,728} = 41.57$$

追加発注点を  $\bar{X} + 1\sigma$  である202単位に設定すると、リードタイム中の需要が在庫量より大きくならない確率は84.13%になる。言い換えると、追加発注点を平均値から1標準偏差分離れた量に設定すると、品切れが起きる確率は  $100\% - 84.13\% = 15.87\%$  になる。表5は、追加発注点を平均値から1標準偏差、2標準偏差、3標準偏差だけ離れた量に設定して、品切れの生起確率を計算したものである。追加発注点を選定する際、品切れを起こさないことによる財務面及び顧客サービス面での便益と、安全在庫の積増しにともなう維持費増加を十分に比較検討する必要がある。

3 この式が成立するには、需要とリードタイムの長さが統計学的意味において互いに独立していることが前提になる。独立していなければ、統計的な正確性と精度を維持するために、式を若干修正する必要がある。この点については Robert G. Brown, *Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1962) : pp.366-67を参照のこと。

表 5 追加発注点の代替案と品切れ確率

追加発注点	品切れが発生しない確率	品切れの確率
$X + 1\sigma = 202$	84.13%	15.87%
$X + 2\sigma = 244$	97.72%	2.28%
$X + 3\sigma = 286$	99.87%	0.13%

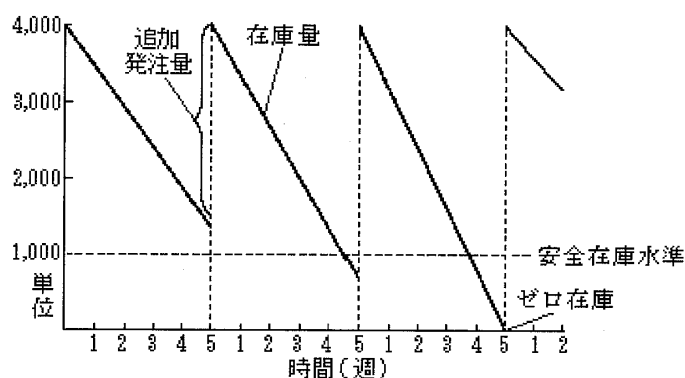
#### Ⅳ．定期発注モデル

定量発注法と並ぶ基本的な在庫管理法として定期発注法がある。これは本質的に一定の規則的な時間間隔において発注するものであり、追加発注する時点でどれだけ在庫が残っているかによって、発注量は変動する。在庫サイクルの終わりに棚卸が行なわれ、その時点の手持ち在庫量を基づいて発注量を決める。

定期発注モデルでは、定量発注モデルことに確実性条件下における定量発注モデルと比べて、在庫水準の頻繁かつ厳格なモニターが不要であり、したがってその分だけ費用はかからない。廉価品の場合大量発注が行われやすく、発注頻度も小さい。したがって、手持ち在庫のチェックは頻繁に行う必要はない。

需要とリードタイムが一定で既知ならば、定期発注法では、まったく同じ在庫量を定期的に追加発注するだけでよい。しかし、需要とリードタイムの少なくともどちらかが可変的であるならば、発注量も都度変更しなければならない。例えば、図11が示すように、一つの在庫サイクルで4,000単位の初期在庫からはじまって、次の発注が行われるまでに2,500単位販売されるならば、4,000単位という初期水準まで在庫を増やすために、このサイクル中にすでに販売された2,500単位に加えて、リードタイム中に販売されると予想される量も追加発注しなければならない。図11は在庫サイクルを5週間とし、サイクルごとに発注量が異なる事例をあらわしている。

図11 定期発注モデル（安全在庫あり）



ロジスティクス・ネットワークで発生する在庫維持費と発注費を削減する有力な手段として、顧客サービスを低下させることなく、在庫水準を引き下げることが求められている。その一般的な方法は、倉庫等の物流拠点を統合して、その数を少なくすることである。その際、顧客サービスを少なくとも悪化させないためには、効率的な輸送システムと情報システムが不可欠になる。

物流拠点統合戦略のもとで、在庫量削減の度合いを決めるのに役立つのが平方根法（SRL）である。それは、総需要を不変と仮定して、物流拠点数を変更することによる総在庫ニーズの変化を推定するものである。一般に、物流拠点数が多くなればなるほど、顧客サービス水準を維持するために必要な在庫量は多くなる。逆に、在庫を少数の場所に統合すると、総在庫水準は減少する。こうした変化の大きさは、平方根法により理解することができる。

平方根法は、将来の施設数における総安全在庫が、既存施設の総在庫量に将来施設数を既存施設数で割った値の平方根を乗じることによって、近似できるという考え方に基づいている。

$$X_2 = X_1 \sqrt{n_2 / n_1}$$

但し、 $n_1$  = 既存施設数       $n_2$  = 将来施設数

$X_1$  = 既存施設の総在庫量       $X_2$  = 将来施設の総在庫量

一例を示そう。全国 8 ケ所の物流拠点を通して 4 万単位のアイテムを供給しているある企業が、2 ケ所に整理統合するとしよう。将来の 2 施設における在庫総量は平方根法により次のように計算される。

$$X_2 = 40,000 \sqrt{2 / 8} = 20,000$$

この分析では、将来の二つの物流拠点には 2 万単位の総在庫があればよい。2 つの物流拠点の規模が同じであり、さらにそれぞれの商圈における市場需要が同じであれば、両拠点は各々全体の 2 分の一、つまり 1 万単位ずつ保管する。反対に、物流センターの数を 8 ケ所からたとえば 32 ケ所に増やすならば、全体の在庫量は 4 万から 8 万単位へと 2 倍になる。

表 6 は、ロジスティクス・システムを形成する物流拠点数の平均総在庫量をあらわしている。例えば、拠点数が 1 ケ所から 25 ケ所に増えるとき、平均総在庫量は 3,885 単位から 19,425 単位に増加する。

表 6 拠点数と在庫量に関する平方根の法則

拠点数(n)	N の平方根	総平均在庫	変化率
1	1.0000	3,885	—
2	1.4142	5,494	141%
3	1.7321	6,729	173%
4	2.0000	7,770	200%
5	2.2361	8,687	224%
10	3.1623	12,285	316%
15	3.8730	15,047	387%
20	4.4721	17,374	447%
23	4.7958	18,632	480%
25	5.0000	19,425	500%

## V. おわりに：これからの研究課題

以上で述べた伝統的な在庫モデルの考え方は、多くの仮定を設けているために非現実的である面は否定できないけれども、在庫管理の論理を体系的に明らかにしていることから、今もなおその役割を終えていない。こうした基本モデルに修正を加える形で、複雑な状況に対応しているのが現状である。そのバリエーションは現在200を越えると言われるが、グローバル物流企業、特に外航コンテナ船社との関連で在庫問題を考えるとき、移動在庫への対応が重要になる。言うまでもなくグローバル物流ことに海上物流においては、輸送途上にある積荷は在庫そのものであり、きわめて長い輸送時間は長いリードタイムと保管時間を意味する。輸送途上にある積荷は在庫管理の面から移動在庫と表現され、物流センターの中にある保管在庫と区別される。

今後の研究すべき課題として、次のような場合における最適発注量と追加発注点である。

- (1) 移動在庫の費用を考慮するケース
- (2) FCL や LCL との関連で、数量逓減運賃率が適用されるケース
- (3) 自己運送を使うケース
- (4) 企業が超過運賃率を利用するケース

さらに、こうした伝統的な在庫モデルが今日のサプライチェーン・ロジスティクスにどう受け継がれているのかも明らかにする必要がある。その結論は、グローバル物流業者が本来の意味でのロジスティクス業者として、荷主企業のロジスティクス効率向上に乗り出すことを可能にするにちがいない。

参考文献

Ronald H. Ballou, Business Logistics Management: Planning, Organizing, and Controlling the Supply Chain, Prentice Hall, 1999

John J. Coyle, Edward J. Bardi and C. John Langley Jr., The Management of Business Logistics, West Publishing Company, 1996

阿保栄司 『ロジスティクスの基礎』 税務経理協会 1998年

織田政夫 『国際複合輸送の実務』 海文堂 1992年

和多田作一郎 『ボーダレス時代のグローバル物流戦略』 産能大学出版部 1997年